

ACQUE

Ricerca
Trivellazione
Captazione

SOTTERRANEE



I MODELLI NUMERICI PER LA PREVISIONE DEGLI EFFETTI
DELL'UTILIZZO DELLE ACQUE SOTTERRANEE NELLE
AREE URBANE SOGGETTE ALL'INTRUSIONE MARINA, IL
CASO DI BARI

M. Polemio - CNR - CERIST, Bari

I modelli numerici per la previsione degli effetti dell'utilizzo delle acque sotterranee nelle aree urbane soggette all'intrusione marina, il caso di Bari

M. Polemio - CNR-CERIST, Bari

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi decenni, le nuove tecnologie e il crescente fabbisogno idrico hanno creato interesse per le acque sotterranee rinvenibili nel sottosuolo di aree intensamente urbanizzate, anche dove tali acque non sono idonee per gli usi civili ordinari. In questo contesto, il CERIST ha intrapreso un'attività di ricerca finalizzata ad accertare l'entità e le modalità di degrado delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque sotterranee fluenti nel sottosuolo di Bari.

Il quadro conoscitivo ad oggi definito ha evidenziato fenomeni notevoli di alterazione della qualità dell'acqua e dell'andamento della superficie piezometrica, dovuti a emungimenti e a immissioni in falda molto intensi. In particolare nell'area urbanizzata, un ruolo rimarchevole si è dimostrato quello degli impianti che si avvalgono delle acque sotterranee per lo scambio di calore.

Per valutare la sensibilità della falda idrica sotterranea a tale tipo di utilizzo, si è fatto ricorso a tecniche di simulazione numerica.

Gli effetti degli impianti per lo scambio del calore con pozzi di prelievo e immissione, nel seguito brevemente denominati di presa-resa, sono stati studiati mediante l'impiego di modelli numerici di

simulazione della sola circolazione idrica sotterranea e del trasporto.

Trattandosi di un acquifero soggetto a intrusione salina, fenomeno che tuttora è il principale artefice del degrado delle locali risorse idriche sotterranee, sono stati definiti modelli di flusso a densità variabile, in grado di risolvere separatamente il problema del trasporto del soluto o del trasporto di energia, secondo una schematizzazione sostanzialmente bidimensionale.

Gli intensi regimi idrici imposti dagli impianti di scambio del calore, necessariamente costituiti da due o più pozzi, spesso di prelievo e di immissione, concentrati in aree poco estese, trattandosi di ambienti fortemente antropizzati, fanno temere, visto che la soggiacenza della falda idrica "profonda" non supera i 5 m nell'area di studio, che le oscillazioni piezometriche causate possano interessare la matrice fine costituente i terreni alluvionali o favorire fenomeni paracarsici nei depositi pleistocenici sui quali poggiano alcune fondazioni dirette di edifici, anche storici, posti nel centro urbano [24].

Si consideri che la resa in falda di acque crea comunque un'intumescenza che si sovrappone alle oscillazioni piezometriche causate dalla marea nonché alle naturali escursioni stagionali, che complessivamente

possono essere stimate in circa 1,5 m nell'area [6,7].

E' stato simulato il funzionamento di un gruppo di pozzi di presa e di resa, costituito da due batterie di 4 pozzi ciascuna, collocati a interasse di 7 m, disposte a 50 m l'una dall'altra lungo la direzione di flusso della falda.

Si è previsto che l'impianto per lo scambio del calore prelevi una data portata dalla batteria di monte e che la reimmetta, nelle medesime condizioni di salinità ma con una assegnata variazione termica, a valle. Il funzionamento nell'anno dell'impianto è stato ipotizzato con un passo giornaliero e in modo che si alternino immissioni con variazione termica pari a -5°C , durante la stagione fredda, a 5°C , durante la stagione calda, e pause di funzionamento.

L'attività è stata finalizzata a caratterizzare il problema, a fornire linee guida che permettano la minimizzazione degli effetti di tali interventi antropici e che tutelino dall'inquinamento salino la porzione ancora dolce delle risorse idriche sotterranee.

1.1. Inquadramento geologico e geomorfologico

La zona che include la città di Bari e i suoi immediati dintorni (Fig. 1) è caratteriz-

zata da depositi pleistocenici, sostanzialmente afferenti alla formazione delle Calcareniti di Gravina, trasgressivi sulla potente ed estesa serie calcareo-dolomitica della Piat-taforma Apula rappresentata ivi dalla Formazione dei Calcari di Bari [7, 15, 25, 31, 32, 36].

La successione stratigrafica, dal basso, costituita da: Calcari di Bari, "depositi bioclastici I", "depositi salmastri", "depositi bioclastici II", "depositi litorali" o "depositi detritici-bioclastici", "depositi dunari" e da "depositi alluvionali" [28, 29].

I Calcari di Bari, riferibili al Barremiano-Turoniano, nell'area studiata sono rappresentati dalla parte media della formazione, costituita da dolomie grigio-scure e da calcari dolomitici grigi, a cui si intercalano calcari bianchi micritici o bioclastici [25]. La potenza dei Calcari di Bari è di circa 2000 m [17].

La distribuzione spaziale dei calcari dolomitizzati risulta spesso difficilmente riconoscibile, anche se ne è stata riconosciuta la rilevanza per la circolazione idrica sotterranea [17, 22].

Tale formazione si presenta in strati e banchi, diffusamente soggetti a carature da dissoluzione.

Il fenomeno carsico, piuttosto diffuso e spesso causa di cavità interstratali o che inte-

ressano fratture, si è generalmente sovrapposto a direttrici tettoniche, anche nell'area urbana di Bari [15, 17, 20].

Le cavità carsiche, molto spesso riempite da depositi prevalentemente costituiti da terre rosse e detriti calcarei, sono talvolta grandi, vere caverne, e quindi non trascurabili ai fini ingegneristici quali la realizzazione delle fondazioni di edifici o dell'impermeabilizzazione degli ambienti interrati o sotterranei cittadini [4, 6, 21].

I Calcari di Bari, dove non affiorano direttamente, presentano a tetto, a seconda della posizione rispetto alla costa, uno dei suddetti depositi pleistocenici di copertura.

Quest'ultima avviene generalmente tramite l'interposizione diretta di almeno uno strato sostanzialmente pelitico, costituito da terre rosse, avente spessore superiore a un metro; spesso si rinvencono due di tali strati, non in contatto stratigrafico tra loro, dovuti alle successive fasi sedimentarie pleistoceniche descritte da Pieri [6, 15, 29, 31].

I depositi della copertura pleistocenica sono riferibili a tre successive fasi sedimentarie tirreniane [29].

La prima fase è caratterizzata dalla deposizione dei "depositi bioclastici I", rinvenibili oggi a quote comprese tra 40 e 60 m slm, costituiti da calcari grossolani, calcareniti e calciruditi.

La seconda fase è associabile alla deposizione dei "depositi salmastri" e dei "depositi bioclastici II".

I "depositi salmastri", costituiti da peliti marnose, sono trasgressivi sui Calcari di Bari e non affiorano perché coperti dai "depositi bioclastici II".

Questi ultimi, simili ai "depositi bioclastici I", sono rinvenibili a quote comprese tra 10 e 25 m slm. A letto sono in trasgressione diretta sui calcari cretaci o in continuità stratigrafica con i "depositi

bioclastici I" o con quelli salmastri. A tetto, dove non affiorano, passano per trasgressione ai depositi litorali o detritico-bioclastici.

I depositi bioclastici sono nel complesso riferibili alla Formazione delle Calcareniti di Gravina (Pleistocene Inf.).

La terza fase sedimentaria è rappresentata dai depositi litorali o detritico-bioclastici (Pleistocene Sup.), rinvenibili tra l'attuale linea di costa e fino a quote di poco inferiori a 12 m slm. Trattasi di terreni a litologia variabile, costituiti da peliti, sabbie, calcareniti, conglomerati e ghiaie [23, 29].

Nel complesso la copertura pleistocenica ha uno spessore complessivo di circa 15 m, che raggiunge i valori massimi in corrispondenza delle depressioni morfologiche del tetto dei calcari cretacei [6, 21].

Tutti i termini calcarenitici sono soggetti nell'area a fenomeni paracarsici, favoriti da

modeste falde idriche superficiali e da considerevoli risalite capillari [24].

I depositi alluvionali olocenici, infine, sono costituiti da ciottoli calcarei, talvolta cementati, immersi in una matrice a luoghi sabbioso-argillosa o limoso-argillosa, depositatisi lungo le incisioni morfologiche, note come "lame".

I caratteri morfologici sono quelli tipici dell'intera Murgia. I motivi principali sono quelli di un pianoro carsico, che degrada verso il mare mediante ripiani e scarpate ad andamento grossomodo subparallelo alla costa.

Tali ripiani perdono continuità laddove il reticolo idrografico, favorito dalla presenza nei calcari di una successione di blande anticlinali e sinclinali orientate WNW-ESE, ha inciso profondamente, per erosione e dissoluzione, le rocce carbonatiche costituenti la piattaforma [17, 29]. Numerose delle suddette

incisioni definiscono un reticolo idrografico convergente verso Bari, in parte abbandonato, in virtù degli interventi attuati da oltre cinquanta anni per difendere la città dalle piene.

1.2. Inquadramento idrogeologico

All'unico acquifero carbonatico profondo murgiano, vasto e potente, si sovrappongono numerosi e modesti acquiferi superficiali, contenuti da depositi plio-pleistocenici e sostenuti dagli strati a maggiore frazione pelitica dei depositi stessi, come nel caso segnalato al di sotto della città antica di Bari [6].

Nel seguito si farà riferimento soltanto all'acquifero carbonatico profondo, viste le finalità del lavoro.

Negli acquiferi carbonatici pugliesi le acque sotterranee hanno come superficie di fondo le acque di mare di invasione continentale; la separazio-

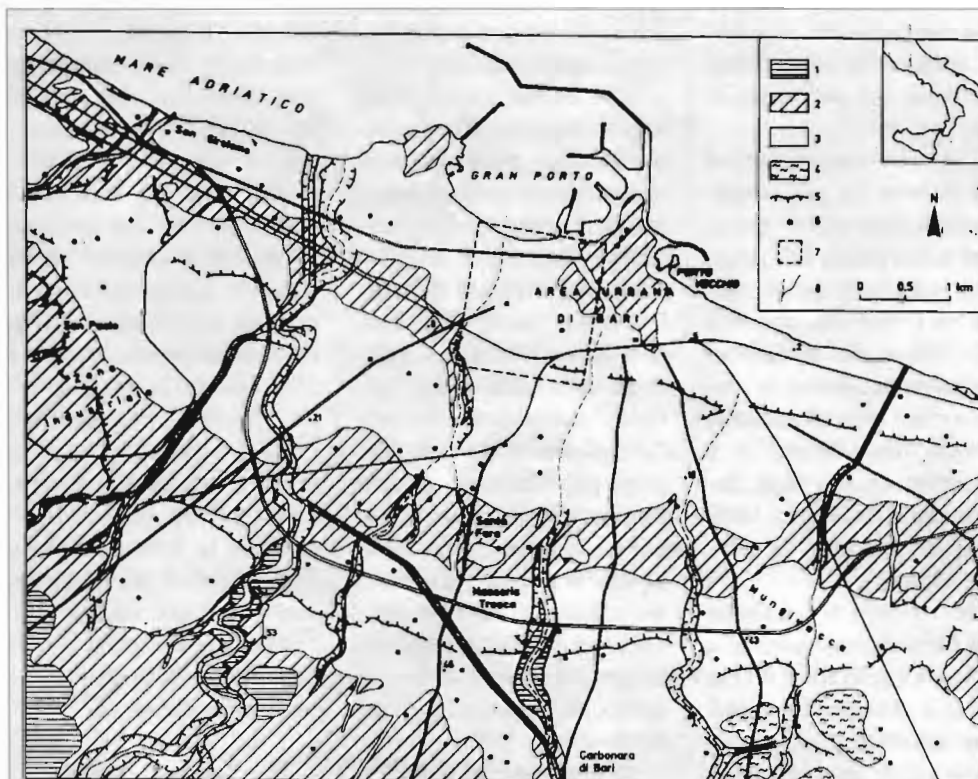


Fig. 1 - CARTA IDROGEOLOGICA E DELL'IDROGRAFIA SUPERFICIALE. Grado di permeabilità (per porosità, dove non diversamente specificato): 1) alta; 2) alta, per fessurazione e carsismo (Calcari di Bari); 3) bassa, all'interno delle depressioni morfologiche (lame) nulla; 4) variabile, da bassa a media; 5) orlo di scarpata; 6) pozzo; 7) limite dell'area interessata dalle simulazioni numeriche 8) reticolo idrografico (abbandonato, se tratteggiato) (da [33], modificata).

ne tra i due corpi idrici è costituita da un'interfaccia a spessore variabile, detta zona di transizione [7].

Secondo tale schematizzazione anche la falda idrica profonda posta nell'acquifero carbonatico murgiano non è limitata inferiormente in modo definito e "galleggia" su acqua di intrusione marina; in realtà, Grassi [16] ha constatato che non esistono evidenze che tale intrusione si estenda a tutto l'acquifero murgiano e ha sottolineato che tale fenomeno si manifesta, con certezza, solo per una fascia che, a partire dalla costa, si estende per 5-7 Km verso l'interno.

Le acque sotterranee murgiane sono risultate così dolci e non miscelate che Grassi [18] dubita che il fenomeno del galleggiamento delle acque dolci su quelle di intrusione si verifichi, se non a profondità inesplorate e superiori ad alcune migliaia di metri [13].

Considerando l'intero acquifero murgiano, la circolazione delle acque sotterranee della falda profonda avviene generalmente in pressione, in virtù della presenza, al di sotto della superficie piezometrica, di strati a minore permeabilità, per l'assenza o minore incidenza della fessurazione e del carsismo, o, secondariamente, per la presenza di strati pelitici pleistocenici; solo a luoghi si verificano condizioni freatiche.

In prossimità della costa le acque sotterranee murgiane circolano generalmente in condizioni freatiche, sia a scala regionale che nell'ambito dell'area urbana di Bari [15, 16, 26].

Per quanto innanzi detto, i Calcari di Bari devono la loro permeabilità essenzialmente a fenomeni secondari, quali la fessurazione e il carsismo.

Diversamente, tutti i depositi quaternari presentano ovunque una permeabilità essenzialmente primaria, dovuta alla porosità, e solo raramente

mente secondaria, anche quantitativamente, in virtù della fessurazione.

I Calcari di Bari presentano una permeabilità insolitamente bassa rispetto ad altri calcari mesozoici pugliesi, per la scarsa diffusione della fratturazione, per la notevole incidenza dei termini dolomitici e per l'esteso intasamento dei vuoti secondari [16].

Nella Murgia, a distanza dalla costa adriatica, le maggiori permeabilità si hanno generalmente a notevoli profondità, anche a centinaia di metri al di sotto del livello del mare [13, 16]. E' noto che lungo la costa, per una fascia di acquifero murgiano larga circa 5 Km, la circolazione idrica sotterranea sia più attiva, in virtù delle maggiori permeabilità, permesse da una più diffusa fratturazione della roccia e da un più attivo carsismo, riscontrabili a quote prossime a quella del livello del mare [18, 22].

Tali circostanze sembrano favorire l'ingressione salina delle acque di mare, rilevata lungo la costa, di cui, sostanzialmente, si perdono le tracce nell'interno dell'acquifero murgiano.

1.3 Inquinamento delle risorse idriche sotterranee

Nel territorio pugliese si è in presenza di due tipologie di inquinamento delle risorse idriche sotterranee, quello salino e quello chimico-batteriológico.

L'inquinamento salino è legato al sovrasfruttamento e alla presenza di forti emungimenti; tuttora continua a coinvolgere nuove porzioni di territorio [7, 8, 19, 34].

L'inquinamento chimico-batteriológico, anch'esso sempre più significativo, è localizzato intorno alle aree urbanizzate, come nel caso di Bari [8, 35].

I rilievi effettuati per accertare l'entità del degrado del-

le acque sotterranee fluenti sotto la città di Bari hanno evidenziato fenomeni di alterazione rilevanti [9].

Il campo di variabilità della salinità si estende da 0,1 a 38,5 g/l, valore tipico delle acque sotterranee soggette all'intrusione salina; il campo delle temperature rilevate è risultato molto ampio, da 15,5 a 34,8°C. Spesso le maggiori salinità sono associate alle depressioni del tetto della falda, dovute al sovrasfruttamento [12].

In zone centrali della città i carotaggi termici hanno evidenziato come l'inizio della stagione estiva è associabile a un incremento non naturale della temperatura delle acque sotterranee. Si è dimostrato che a Bari gli impianti per lo scambio di calore che si avvalgono delle acque sotterranee mediante pozzi di presa, con o senza resa, hanno un ruolo rilevante nel determinare le caratteristiche chimico-fisiche delle stesse [9].

2. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DELL'ACQUIFERO NELL'AREA DI STUDIO

In termini relativi, nell'area in studio i calcari cretacei presentano in affioramento un'elevata permeabilità per fessurazione e carsismo (Fig. 1).

I terreni quaternari sono permeabili essenzialmente per porosità primaria. La permeabilità di tali terreni, ad eccezione di alcuni modesti affioramenti di alluvioni, è inferiore a quella dei calcari cretacei ed è generalmente bassa, se non praticamente nulla, come nel caso delle terre rosse, affioranti lungo le sponde del reticolo idrografico.

La falda idrica profonda nell'area circola in condizioni freatiche, oppure è tenuta leggermente in pressione da stra-

ti carbonatici cretacei meno permeabili o, secondariamente, da depositi quaternari.

Per acquisire gli elementi necessari a definire i modelli numerici, sono stati esaminati ed elaborati i dati relativi alle numerose perforazioni eseguite nell'area urbana di Bari.

In particolare, la stratigrafia di Fig. 2, relativa a una colonna di acquifero lunga 250 m, è da ritenersi rappresentativa per tutta l'area [10].

In affioramento sono stati rinvenuti, per non più di 10 m di profondità, terreni quaternari in cui sono riconoscibili più litotipi sciolti, a litologia variabile dalle sabbie, al più poco addensate e diagenizzate, ai limi e alle argille.

Al di sotto, per tutta la restante profondità esplorata, i calcari micritici o detritici si alternano ai calcari dolomitici e alle dolomie. In particolare, i termini non dolomitici prevalgono, costituendo il 75 % della lunghezza totale.

Nel complesso, le rocce acquifere si presentano solo moderatamente fratturate.

I calcari si presentano di colore chiaro, variabile dal biancastro degli strati micritici al bianco-giallo paglierino degli strati detritici, ricchi spesso di fossili.

Il fenomeno carsico nei livelli calcarei si sviluppa generalmente tra gli strati e lungo le fratture ed è più frequente nella facies micritica.

Gli strati a carattere dolomitico sono più regolari, con spessori generalmente maggiori e pari a circa un metro, di colore grigio-scuro.

Il fenomeno carsico è più raro, spesso è assente.

Il carotaggio della radioattività naturale del terreno segnala perfettamente, con i suoi valori estremi, le variazioni significative delle caratteristiche della roccia. I massimi sono generalmente associati alla presenza di terre rosse, secondariamente di altre intercalazioni pelitiche o di cal-

cite che riempiono le cavità carsiche, come già notato da Grassi et al. [22].

Gli altri picchi, secondari, sono spesso associabili ai passaggi calcari-dolomie, troppo frequenti per essere rappresentati, che generalmente si associano a valori minimi dell'indice di qualità RQD; tale "lettura" dei carotaggi è favorita dalla frequente presenza di esili intercalazioni di terre rosse tra le discontinuità strutturali e di stratificazione.

I carotaggi della salinità e della temperatura idrica presentano un gradiente con la profondità generalmente positivo; fanno eccezione i primi 30 m di carotaggio termico, in cui il gradiente cambia sia di valore che di segno.

Ciò conferma quanto siano macroscopici gli effetti dello scambio di calore, effettuato a Bari mediante le acque sotterranee [9]. Si noti anche che i profili della temperatura e della salinità presentano delle brusche variazioni del gradiente laddove si verificano cambiamenti litologici o significativi delle caratteristiche delle rocce. Come già noto, l'intenso sfruttamento della falda profonda provoca un'accentuata estensione della zona di transizione, essendo questa riconoscibile da 30 m di profondità dal p.c. fino alle massime profondità esplorate [8,9].

Per esprimere in modo quantitativo le permeabilità dei litotipi acquiferi, sono state raccolte numerose prove di portata, eseguite generalmente su tutta la colonna filtrante, e prove di assorbimento a tratti, eseguite generalmente durante l'avanzamento delle perforazioni.

I dati disponibili sono stati resi omogenei; le permeabilità sono state determinate applicando più metodologie analitiche, infine si è cercato di determinare la permeabilità di porzioni di acquifero aventi lo spessore di 10 m, consideran-

do il contributo unitario di ciascuno di questi alla portata emunta o assorbita [1, 2, 3, 5].

E' così emerso che il comportamento idrogeologico dei diversi orizzonti rocciosi sia accentuatamente variabile, lungo la verticale (Fig. 2).

Si è notato che nell'area

la permeabilità decresce progressivamente con la profondità, ad eccezione di alcuni livelli che, nel caso rappresentato in fig. 2, sono posti intorno a 120 e 170 m dal piano campagna.

Il primo recupero di permeabilità è chiaramente lega-

to all'accentuata fratturazione e, secondariamente, al carsismo rilevato in tali orizzonti, il secondo era sicuramente meno prevedibile, in virtù di una apprezzabile ma non rilevante fratturazione.

La permeabilità varia da 10^{-3} a 10^{-6} m/s, procedendo dal-

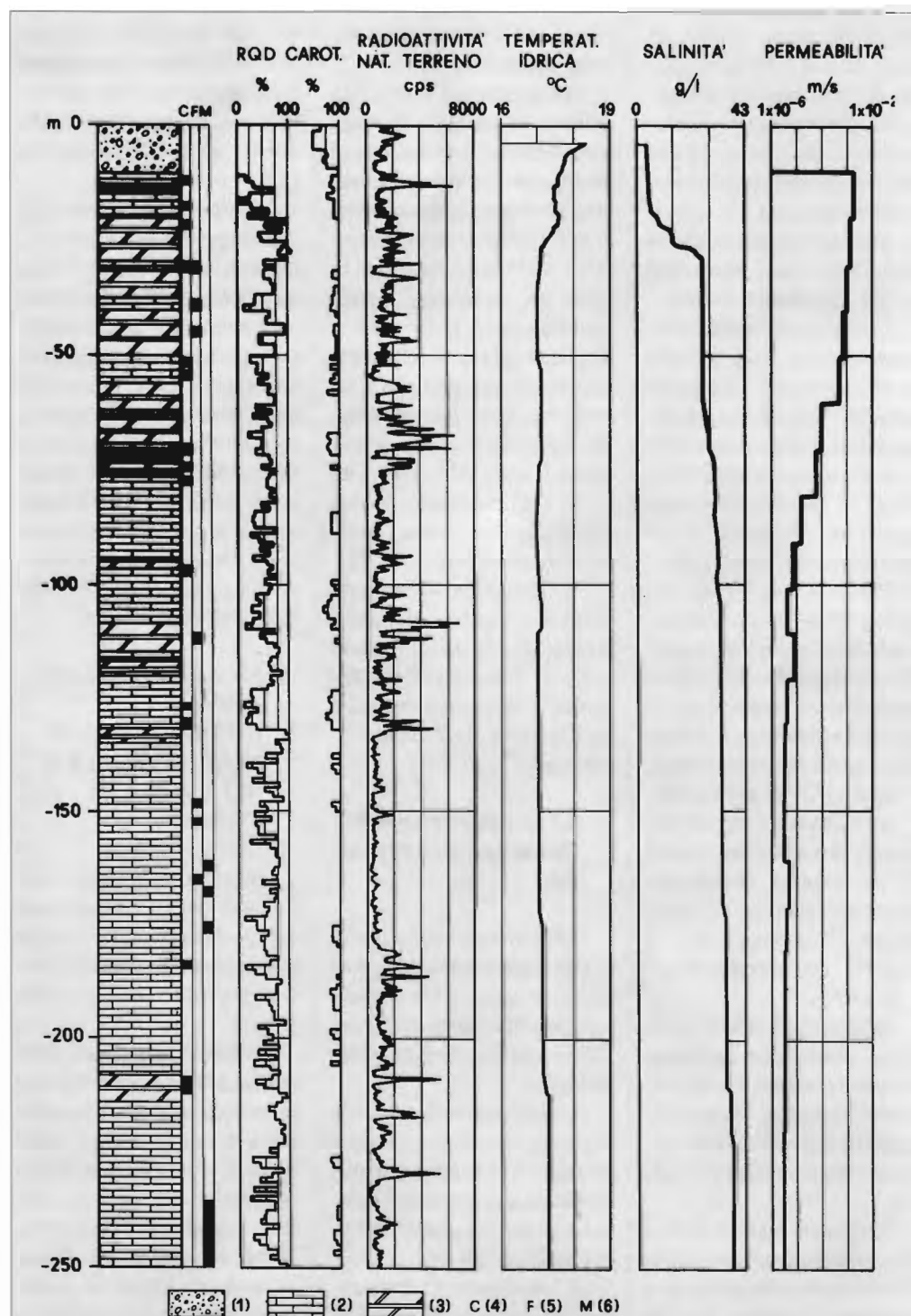


Fig. 2 - STRATIGRAFIA, CAROTAGGI E PERMEABILITA' DELLA PORZIONE DI ACQUIFERO INTERESSATO DALLE SIMULAZIONI. Stratigrafia dei terreni dall'alto: 1) materiale di riporto incoerente, limi sabbiosi e sabbie, debolmente addensate e diagenizzate verso il basso; 2) calcare micritico e detritico 3) calcare dolomitico e dolomia. Caratteristiche degli strati: C) intensamente carsificati; D) intensamente fratturati; M) presenza di fossili marini. (da [10], modificata).

l'alto verso il basso.

I massimi valori della permeabilità, riscontrati nei 30 m più superficiali dell'acquifero carbonatico, sono notevoli se confrontati con quelli relativi all'interno del territorio murciano e sono concordi con quanto segnalato da altri autori [8, 9, 10, 12, 26, 35] e da esperienze svolte da terzi per finalità professionali.

Il flusso idrico è influenzato da forti anisotropie, particolarmente significative nelle giaciture verticali. Anche in prossimità della costa, le acque sotterranee seguono, quindi, percorsi determinati dalla fratturazione e dal carsismo, a volte molto diverse da quelli ipotizzabili in base alla posizione rispetto al mare, come emerso in pieno centro cittadino [15]. Considerando l'in-

tero territorio urbano, il flusso idrico ha una direzione N-S, sostanzialmente diretto verso la costa [12].

3. SIMULAZIONI DEL TRASPORTO DEL SOLUTO E DELL'ENERGIA

Sono state eseguite diverse simulazioni numeriche finalizzate alla determinazione delle modificazioni indotte sulla distribuzione spaziale della temperatura e della salinità delle acque sotterranee.

Per simulare realisticamente tali evoluzioni è necessario adottare un modello di flusso dell'acqua sotterranea a densità variabile, con trasporto di soluto [14]. Nello studio delle variazioni del campo della salinità dell'acqua, la pro-

fondità di prelievo e di resa è stata ipotizzata a 25 (caso A), 100 (caso B) e 250 m (caso C) dal piano campagna.

In questo modo si è inteso osservare le modificazioni degli effetti nelle stesse ipotesi di sfruttamento, al variare delle caratteristiche dell'acquifero direttamente interessato, in particolare della permeabilità, e della falda idrica, in relazione alla stratificazione salina.

Recependo le ipotesi e i risultati già conseguiti anche dall'autore nello studio dei casi A e C [14], è stato studiato il caso B, determinando un più completo quadro comparativo; per la descrizione di dettaglio delle metodologie si rimanda, per brevità, alla bibliografia. Le Figg. 1 e 3 mostrano l'ubicazione delle maglie utilizzate per queste simulazioni.

E' emerso che dopo 4 anni di esercizio l'area influenzata dall'impianto, in termini di variazioni di salinità, tende an-

cora ad allargarsi, anche se lentamente.

Si è accertato che, dopo quattro anni di funzionamento simulato, si determina, nei tre casi, un "disturbo" al campo iniziale delle salinità collocato in una porzione di acquifero avente una forma lenticolare, con una prevalente dimensione orizzontale, parallela alla direzione naturale di flusso (Figg. 3 e 4) [11, 14].

La variazione massima in valore assoluto della salinità è risultata nel caso della presa-resa a 25 m di profondità pari a +11,3 g/l, nel secondo caso pari a +2,4 g/l, mentre nel caso C è risultata negativa, pari a -3,7 g/l.

La forma lenticolare delle anomalie saline è associabile a flussi idrici che seguono circuiti chiusi e brevi tra i due punti di presa e resa e alla presenza di componenti verticali, nei due versi, imposti dagli intensi regimi di presa e resa. In particolare, la diversa entità è segno delle anomalie

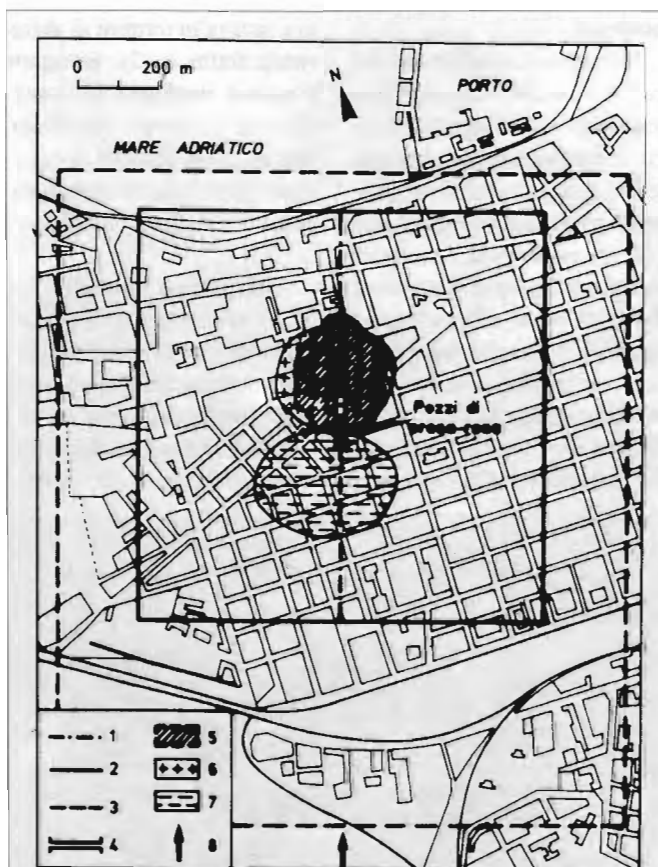


Fig. 3 - AREA INTERESSATA DALLE SIMULAZIONI NUMERICHE NELLA CITTA' DI BARI E SINTESI DEI RISULTATI:

1) traccia della sezione verticale contenente la maglia delle simulazioni del trasporto di soluto; 2) limite della maglia delle simulazioni del trasporto di energia termica; 3) limite della griglia tridimensionale delle simulazioni del solo flusso; 4) tratto interessato da variazioni della salinità; 5) incrementi della temperatura; caso della presa-resa di complessivi 20 l/s (strato 2) 6) incrementi dei livelli piezometrici 7) decrementi dei livelli piezometrici.

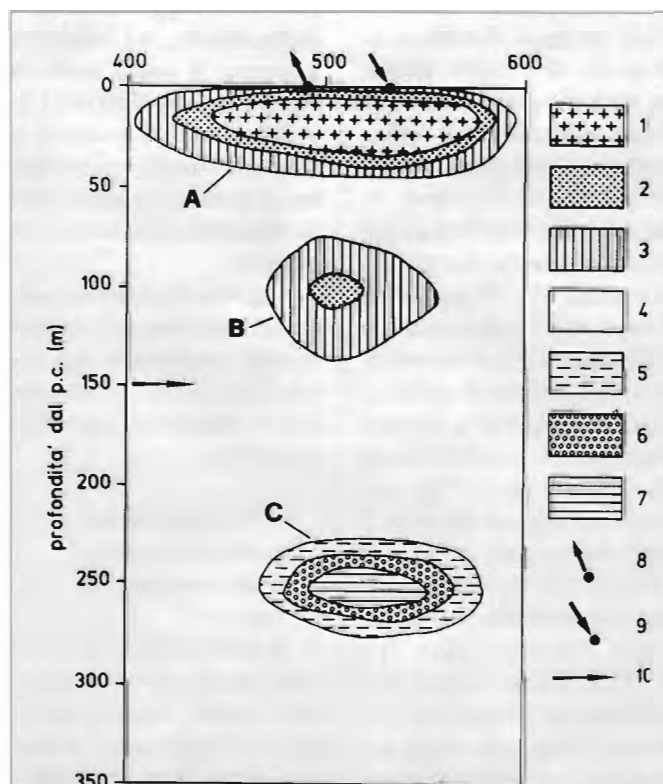


Fig. 4 - CONFRONTO DELLE VARIAZIONI DELLA SALINITA' (g/l) DOPO 4 ANNI DI ESERCIZIO NELLE IPOTESI DI PRESA-RESA A (A) 25, (B) 100 e (C) 250 m di profondità: 1) maggiore di 3, 2) da 2 a 3; 3) da 1 a 2; 4) da -1 a 1; 5) da -2 a -1; 6) da -3 a -2; 7) minore di -3; 8) presa; 9) resa; 10) direzione naturale di flusso idrico sotterraneo.

saline, è interpretabile come: l'effetto della miscelazione delle acque fluenti naturalmente negli strati interessati dalla presa-resa con acque provenienti dal basso, a maggiore salinità, nel caso A; l'effetto della miscelazione con acque provenienti dall'alto, a minore salinità, nel caso C; ad entrambi gli effetti innanzi detti, modulati dalle diverse permeabilità riscontrate lungo la verticale, nel caso B.

Tali elementi dimostrano che i casi B e C forniscono i risultati più incoraggianti (Fig. 2). In particolare, si osservi che l'ipotesi "B" produce effetti sostanzialmente limitati nella fascia compresa da 0 a 50 m di profondità dal p.c., ove circola la falda dolce, e comunque contenuti, non migliori di quanto causato dall'ipotesi C, ma conseguiti a fronte di una rilevante minore profondità dei pozzi.

Il funzionamento di un impianto per lo scambio del calore impone generalmente un regime termico non bilanciato, anche se si tratta di un impianto di climatizzazione, in virtù del prevalente ruolo svolto dalle calorie da cedere durante l'estate rispetto a quelle da acquisire d'inverno, viste le locali condizioni climatiche; un tale funzionamento determina un "disturbo" al campo delle temperature dell'acquifero. Le simulazioni effettuate mostrano il verificarsi di un progressivo inquinamento termico, caratterizzato da temperature via via crescenti nel tempo e che dopo 5 anni coinvolgono un'area di 200 m x 250 m circa, con variazioni termiche non superiori a 3° C (Fig.3) [14].

Tale effetto risulterebbe decisamente più marcato laddove la falda venga usata per impianti che smaltiscono acque soggette a una variazione termica di segno costante nell'anno.

4.SIMULAZIONE DELLE MODALITÀ DI FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO

La soluzione del problema della quantificazione delle variazioni piezometriche dovute al funzionamento di un campo pozzi di presa e resa avrebbe dovuto tener conto dell'opportunità di simulare il funzionamento di pozzi cementati attraverso gli strati in cui la falda corre maggiori rischi di inquinamento salino da sovrassfruttamento.

Anche se in modo schematico, si sarebbe dovuto tener conto della variabilità spaziale delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero, con particolare riferimento al gradiente della permeabilità con la profondità.

Infine, le ipotesi assunte, riflettendo la realtà dell'utilizzo urbano, prevedono la sovrapposizione dei coni di depressione-sovrappressione, dovute alla realizzazione di campi costituiti da pozzi a interesse molto minore del raggio di influenza, in questi ambienti anche maggiore di 500 m [12].

L'analisi delle modalità di flusso avrebbe dovuto permettere una valutazione critica dei risultati delle simulazioni del trasporto.

Tali obiettivi sono stati perseguiti mediante un modello numerico tridimensionale del solo flusso idrico sotterraneo, con un approccio alle differenze finite.

4.1.Generalità sul modello numerico tridimensionale di flusso

Il movimento delle acque sotterranee nelle tre direzioni dello spazio, trascurando gli effetti delle variazioni di densità del fluido, può essere descritto mediante la seguente equazione differenziale:

$$\delta(K_x \delta h / \delta x) / \delta x + \delta(K_y \delta h / \delta y) / \delta y + \delta(K_z \delta h / \delta z) / \delta z - W = S_s \delta h / \delta t \quad (1)$$

dove K_x , K_y e K_z sono i

coefficienti della permeabilità del mezzo all'acqua lungo gli assi X, Y e Z, paralleli agli assi principali per il suddetto parametro; h il carico idrostatico; W rappresenta il flusso entrante o uscente per unità di volume; S_s equivale al coefficiente di immagazzinamento e t rappresenta il tempo.

L'equazione (1) descrive il flusso idrico sotterraneo in condizioni transitorie in un acquifero eterogeneo e anisotropo. Definite le condizioni iniziali al contorno, la (1) può considerarsi una rappresentazione matematica del sistema del flusso idrico sotterraneo.

Ad eccezione dei sistemi acquiferi molto semplici, le soluzioni analitiche della suddetta equazione non sono individuabili analiticamente; per sopperire a tale limitazione si ricorre solitamente a metodi numerici [28].

L'approccio utilizzato nel caso in esame si basa sul metodo delle differenze finite, in cui il mezzo continuo naturale, il cui comportamento idrogeologico è descritto dalla precedente equazione, è sostituito da un insieme discreto e finito di punti disposti nello spazio e nel tempo, tale che le derivate parziali sono sostituite dalle differenze dei valori assunti da "h", calcolate nei punti prescelti nello spazio e

nel tempo [27].

Si consideri che secondo tale approccio un acquifero multistrato si può schematizzare mediante le unità geometriche rappresentate in Fig. 5.

Esprimendo la (1) per ciascuna cella, posta lungo la riga i , la colonna j e lo strato k , il sistema di equazioni ottenuto deve soddisfare il principio della continuità, il che comporta che la somma delle portate Q_f fluenti attraverso le sei facce della cella i, j, k nell'intervallo di tempo assegnato t sia pari alla variazione del volume di acqua immagazzinato nella stessa. Nelle ipotesi formulate, ciò comporta che:

$$\sum Q_f = S_s \Delta h V \quad (2)$$

dove V è il volume della cella i, j, k e Δh la variazione piezometrica nella cella i, j, k nell'intervallo Δt .

L'insieme delle equazioni (1), scritta in termini di differenze finite, e (2), entrambe espresse mediante le condizioni al contorno opportune, definisce un sistema di equazioni risolubile mediante procedure di calcolo iterativo.

4.2. Il caso in studio

E' stata simulata superiormente una condizione di falda libera caratterizzata da una cadente mediamente pari all'uno per mille, sulla base dei rilievi diretti eseguiti e in accordo

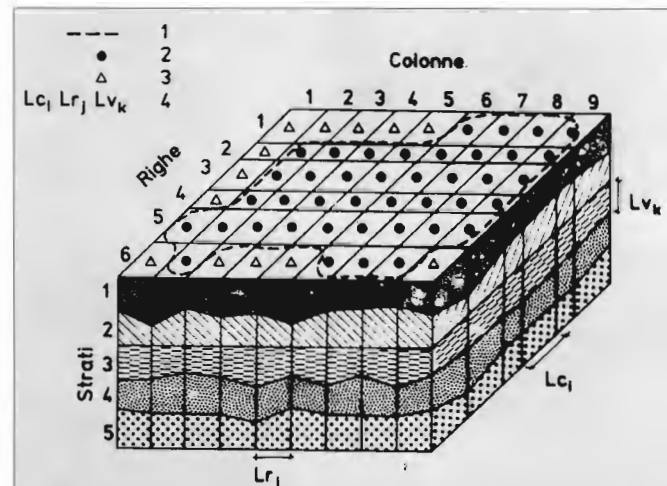


Fig. 5 - LA SCHEMATIZZAZIONE DEL GENERICO MODELLO TRIDIMENSIONALE: 1) limite planimetrico dell'acquifero; 2) cella attiva; 3) cella inattiva; 4) dimensioni della cella posta lungo la riga i , la colonna j , e lo strato k .

con quanto noto [12, 26].

In una fase iniziale, necessaria per apprezzare l'affidabilità delle ipotesi e dei parametri introdotti e per determinare una superficie piezometrica di riferimento per le successive elaborazioni, le altezze piezometriche lungo il lato di monte e quello del mare sono state mantenute costanti (condizione al contorno di primo tipo o di Dirichelet) e con i pozzi inattivi.

Ciò ha permesso di stimare la portata naturale fluente; nelle fasi successive è stata immessa la suddetta portata (condizione del secondo tipo o di Neumann) dal lato di monte e le relative altezze piezometriche sono state lasciate libere (Fig.6). Le celle poste lungo la costa adriatica sono state sempre soggette alla condizione di carico imposto e costante, quelle lungo i lati longitudinali sono state soggette a una portata costante e nulla (Figg. 3 e 6). Inferiormente, l'acquifero schematizzato è delimitato da una base impermeabile.

Il modello prevede tre strati, il cui spessore è pari a 100, 100 e 150 m, procedendo dall'alto verso il basso, per complessivi 350 m di spessore dell'acquifero.

La griglia prevede elementi di dimensioni planimetriche minime di 7x7m, in corrispondenza del campo pozzi.

Si è ipotizzato di realizzare 8 pozzi profondi complessivamente 200 m, cementati nei primi 100 m, in presa o in resa nei restanti 100 m.

Relativamente ai dati assunti nella simulazione, si è fatto ricorso a dati appositamente rilevati nell'ambito dell'attività di ricerca a cui questo lavoro afferisce, raccolti negli anni dal CNR CERIST e dall'Istituto di Geologia Applicata e Geotecnica del Politecnico di Bari, nonché emersi dalla bibliografia.

Lo studio effettuato in termini di variazioni verticali

della permeabilità ha permesso di variare e affinare quanto assunto in precedenza [14].

La permeabilità degli strati nelle giaciture orizzontali è stata mediamente assunta dall'alto verso il basso, pari a 10^{-4} , 7×10^{-6} e 3×10^{-6} m/s.

La conduttanza idraulica verticale tra gli strati C, definita come la portata fluente tra celle sovrapposte in virtù di una differenza unitaria di carico idrostatico [$L^2 T^{-1}$], è stata fissata, cella per cella, in funzione dello spessore e della permeabilità degli strati, del rapporto tra permeabilità verticale e orizzontale, assunta pari a 1/10, nonché delle dimensioni delle celle. In particolare, tra le celle i, j, k e $i, j, k+1$ si è assunto:

$$C_{i,j,k,k+1} = 2 L_{c,i,j} K_{z,i,j,k} K_{z,i,j,k+1} / (L_{v,k} K_{z,i,j,k+1} + L_{v,k+1} K_{z,i,j,k}) \quad (3)$$

Al termine delle simulazioni è stata determinata, strato per strato, la massima variazione assoluta del livello piezometrico in condizioni stazionarie, per diversi regimi di funzionamento.

E' stato ipotizzato che i due gruppi di quattro pozzi di presa e di quattro di resa siano interessati singolarmente da una portata totale di 6 (ovvero di 1,5 l/s per ciascun pozzo), 10, 20, 40, 80 e 120 l/s. Inoltre, in tutti i casi sono state eseguite simulazioni in cui si è previsto il funzionamento limitato ai soli pozzi di presa, qualora la resa sia prevista con un diverso recapito.

La superficie piezometrica risultata dall'utilizzo di un modello monostrato, più semplice di quello presentato, rappresenta meglio la qualità del fenomeno: l'esercizio del campo pozzo di presa e resa determina una depressione e un innalzamento della superficie della falda con un andamento grossomodo simmetrico, cui corrisponde un valore nullo della depressione, nel punto di simmetria del campo pozzi (Fig.7).

In realtà, lo schema non è simmetrico in quanto le condizioni al contorno sul lato di monte e di valle sono diverse, ciò comporta che le variazioni piezometriche a valle del campo pozzi (incrementi) risulteranno attenuate dalla presenza del mare.

La Fig.8 riassume, in estrema sintesi, gli effetti delle simulazioni; espressi in termini di massima variazione assoluta del livello piezometrico per ciascuna cella. Le variazioni massime assolute sono risultate sempre delle depressioni, anche nei casi di resa in falda, in quanto le condizioni al contorno lungo il

limite di valle, a carico imposto, limitano le altezze del pseudo-cono di resa, così denominato in quanto in realtà si tratta della sovrapposizione di più superfici coniche contigue. Conformemente alle ipotesi di flusso, le variazioni piezometriche massime assolute sono risultate in relazione lineare con la portata totale.

Nei casi da 40 a 120 l/s la variazione assoluta del livello piezometrico in corrispondenza dello strato 2, quello utilizzato dai pozzi, è enorme.

Tale circostanza non sorprende se si considera che la portata naturale fluente verso il mare attraverso la porzione

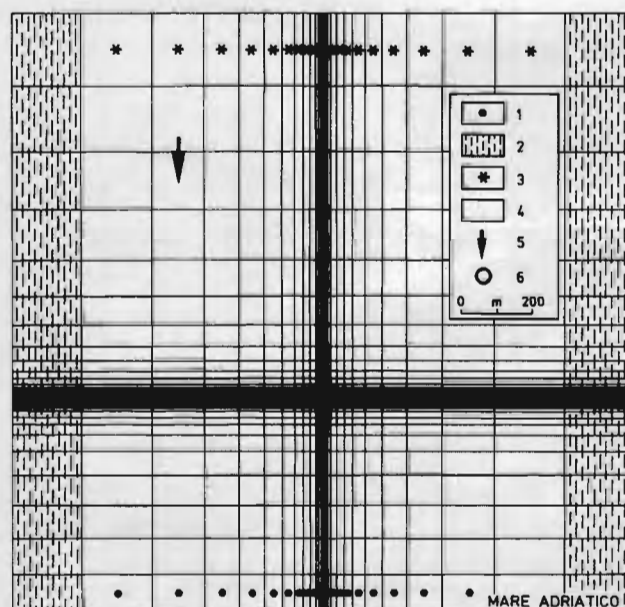


Fig. 6 - LA GRIGLIA DELLA SIMULAZIONE TRIDIMENSIONALE DEL SOLO FLUSSO E LE CONDIZIONI AL CONTERNO: 1) cella a carico assegnato; 2) cella a flusso nullo; 3) cella a carico assegnato nella fase iniziale e a portata assegnata in quella finale; 4) cella libera; 5) direzione naturale di flusso idrico sotterraneo; 6) campo pozzi.

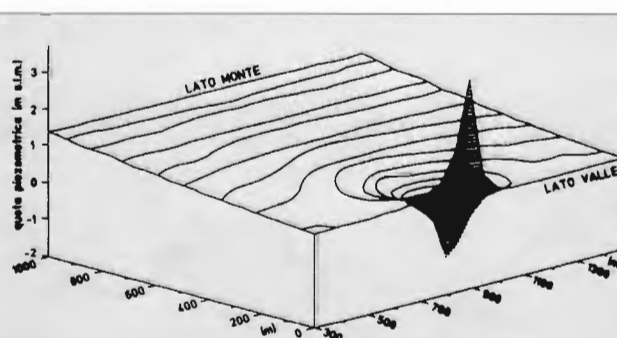


Fig. 7 - VEDUTA PROSPETTICA DELLA SUPERFICIE PIEZOMETRICA NEL CASO DI UN ACQUIFERO MONOSTRATO LA CUI FALDA IDRICA SIA SOGGETTA A PRESA-RESA.

di acquifero simulata è stimabile complessivamente in circa 11 l/s. In tali condizioni, le forti sollecitazioni imposte alla falda, quali la presa-resa o la sola presa, non possono che determinare effetti macroscopici.

Vista la grande mole di elaborazioni numeriche eseguite e la conseguente enorme massa di risultati analizzati, nel seguito si riferirà essenzialmente in relazione a due soli casi, quanto indispensabile per giustificare le considerazioni più significative emer-

se.

Si presentano gli effetti dell' utilizzo di 6 e di 20 l/s, ovvero di un caso in cui la portata totale fluente nei pozzi è minore di quella naturale e di un caso in cui maggiore.

La superficie piezometrica ipotizzata o, meglio, le tre superfici, una per ciascuno strato, all'inizio sostanzialmente piane, subiscono delle deformazioni per l'esercizio dei pozzi che sono più evidenti se si considerano le depressioni piezometriche causate dalla presa-resa di una portata

totale di 20 l/s (Fig. 9).

Nel primo strato la concavità delle linee isovalori delle depressioni è rivolta prima verso monte, a monte del campo pozzi, e poi verso valle, ovvero verso il mare. Ciò si spiega con la circostanza che a monte dei pozzi, lo strato 1 viene drenato lungo la via più breve che conduce al punto di prelievo, posto nello strato 2, mentre a valle viene alimentato dalle acque che risalgono dai tratti filtranti dei pozzi in resa, seguendo linee di flusso che divergono dall'asse mon-

te-valle. L'effetto di depressione è sempre modesto ed è crescente verso monte, secondo un andamento tale che i limiti del modello paralleli alla direzione monte-valle sono sostanzialmente normali alle linee isovalori, coerentemente con le condizioni al contorno.

Al crescere della portata totale di presa-resa le depressioni nel primo strato a valle del campo pozzi decrescono, assumendo valori negativi, vere e proprie sovrappressioni, nel caso di 120 l/s.

Nel secondo strato si verifica il fenomeno già qualitativamente descritto, con due pseudo-coni di de-sovrappressione. Al variare del regime, tali coni assumono un'estensione in pianta via via più grande, ma sempre significativamente inferiore a quella della porzione di acquifero simulato.

Nel terzo strato, l'andamento delle depressioni piezometriche è simile a quello del secondo strato, pur se qui si sente di più l'effetto della condizione di carico costante lungo il limite di valle, che si manifesta con la minore estensione lungo il limite stesso della porzione di strato racchiuso della linea a variazione nulla.

Gli effetti descritti e rappresentati dalle Figg. 9-11, nel caso di portata totale pari a 20 l/s, sono validi e sono, per tutti i casi studiati, via via più accentuati al crescere della portata totale da 6 a 120 l/s.

La Fig. 10 mostra in assonometria l'andamento delle tre superfici piezometriche, nel caso di presa e resa di 20 l/s complessivi.

La Fig. 11 mostra le sezioni verticali del modello tridimensionale della superficie piezometrica, tracciate seguendo una linea monte-valle, passante per il campo pozzi. Il confronto del caso naturale con gli effetti dovuti a un utilizzo di 6 e 20 l/s di presa e resa mostra come il funziona-

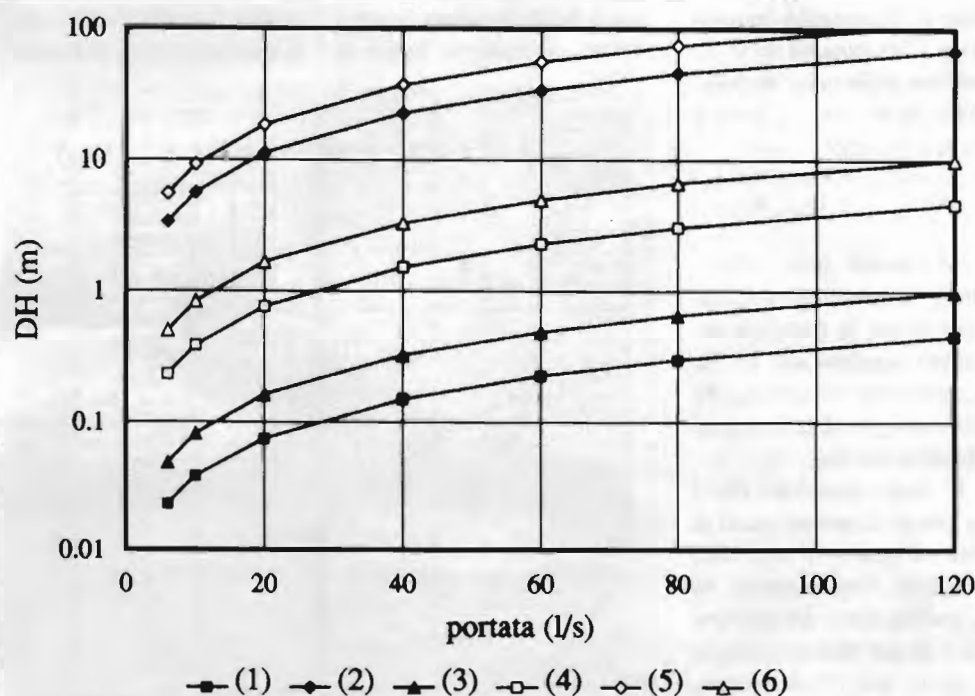


Fig. 8 - MASSIMI ASSOLUTI DELLE VARIAZIONI PIEZOMETRICHE (DH) NELLE SIMULAZIONI DEL SOLO FLUSSO: presa e resa, strato 1 (1), 2 (2) e 3 (3); solo prelievo, strato 1 (4), 2 (5) e 3 (6).

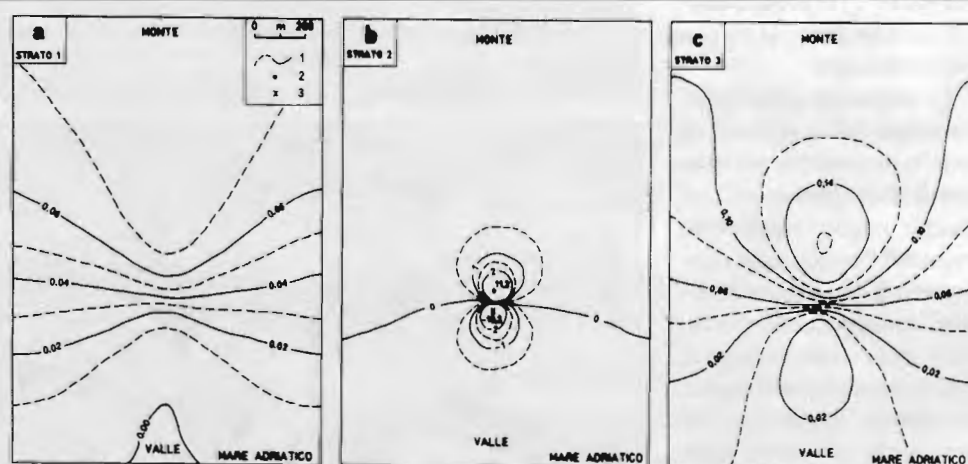


Fig. 9 - DEPRESSIONE PIEZOMETRICA (m) NEI TRE STRATI, CAUSATA DA UNA PORTATA TOTALE DI PRESA-RESA PARI A 20 l/s. 1) Linea isovalore, 2) pozzi in presa, 3) pozzi in resa.

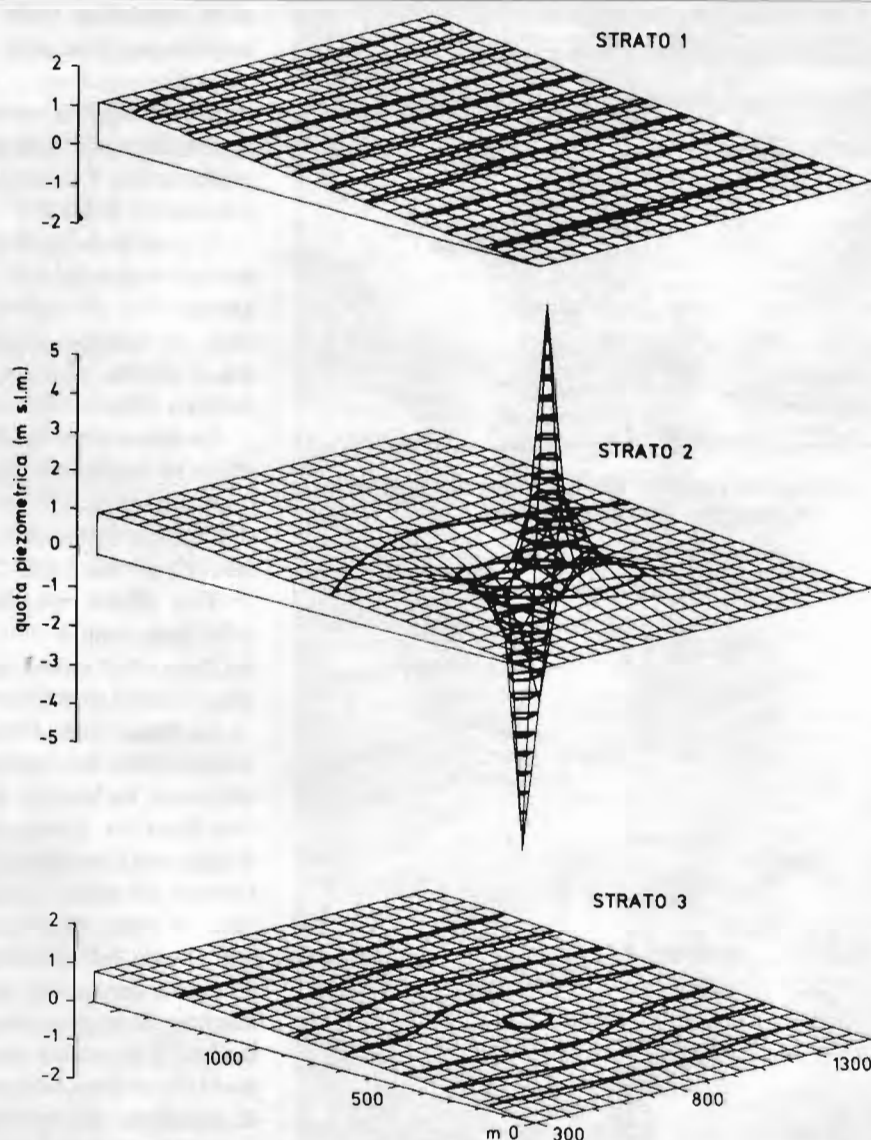


Fig. 10 - VEDUTA ASSONOMETRICA DELLA QUOTA PIEZOMETRICA (m s.l.m.) NEI TRE STRATI, CAUSATA DA UNA PORTATA TOTALE DI PRESA-RESA PARI A 20 l/s.

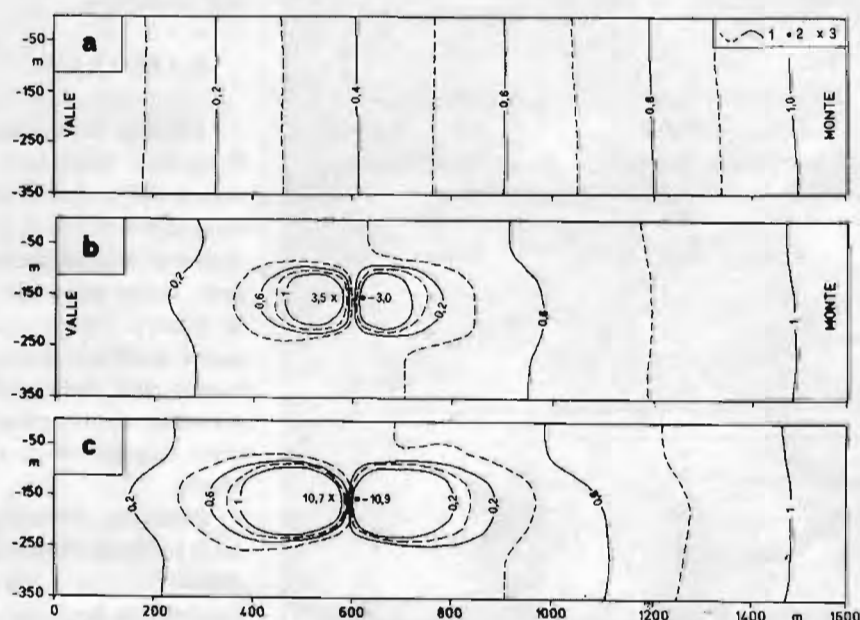


Fig. 11 - SEZIONE VERTICALE MONTE-VALLE PASSANTE PER IL CAMPO POZZI: QUOTA PIEZOMETRICA (m s.l.m.) PER PORTATA TOTALE DI PRESA-RESA (a) NULLA, (b) PARI A 6 l/s, (c) PARI A 20 l/s. 1) Linea isovalore, 2) pozzi in presa, 3) pozzi in resa.

mento dell'impianto crei una anomalia piezometrica lenticolare, allungata nella direzione di flusso naturale.

Procedendo da monte verso valle la falda viene drenata richiamando acqua dallo strato 1, ovvero dall'alto, e dallo strato 3, ovvero dal basso; a valle del campo pozzi il fenomeno si inverte.

In tal modo si crea un flusso idrico che prima richiama acqua più dolce dall'alto e più salmastra dal basso e poi la respinge in parte in alto e in parte in basso; tale meccanismo spiega e conferma la qualità dei fenomeni, in termini di flusso, emersi dalle simulazioni delle variazioni della salinità.

In tutti i casi di presa-resa simulati non si è verificato un afflusso di acqua di mare all'interno del modello.

Nel caso del solo prelievo di 20 l/s le depressioni interessano interamente tutti i tre strati; solo nel primo strato non si determina la tipica depressione concentrica al campo pozzi (Fig. 12). In termini di quote piezometriche si osserva qualcosa di più interessante confrontando gli effetti del prelievo di 6 e 20 l/s: nel caso con portata minore di quella naturale si determina un richiamo di acqua attraverso l'acquifero e proveniente dal mare, nullo solo nello strato 1, mentre al crescere della portata questo effetto interessa tutti gli strati e tutta la lunghezza del limite del modello disposto lungo il mare (Figg. 13 e 14).

I risultati illustrati mostrano come le scelte effettuate in termini di estensione della porzione di acquifero simulata siano adeguate ai casi di presa-resa e che vadano "strette" ai casi di solo prelievo, soprattutto perchè gli effetti piezometrici causati coinvolgono tutto il modello, subendo in tal modo l'influenza delle condizioni al contorno ipotizzate. D'altra parte, una mag-

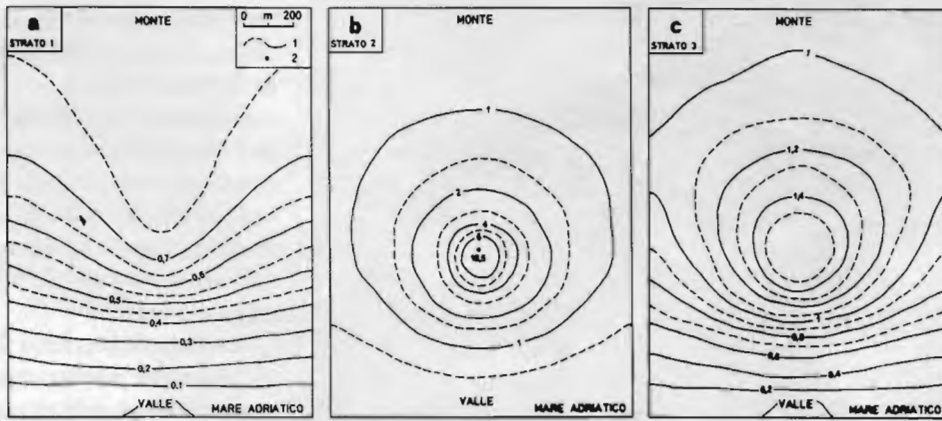


Fig. 12 - DEPRESSIONE PIEZOMETRICA (m) NEI TRE STRATI CAUSATA DA UNA PORTATA TOTALE DI PRELIEVO PARI A 20 l/s. 1) Linea isovalore, 2) pozzi in presa.

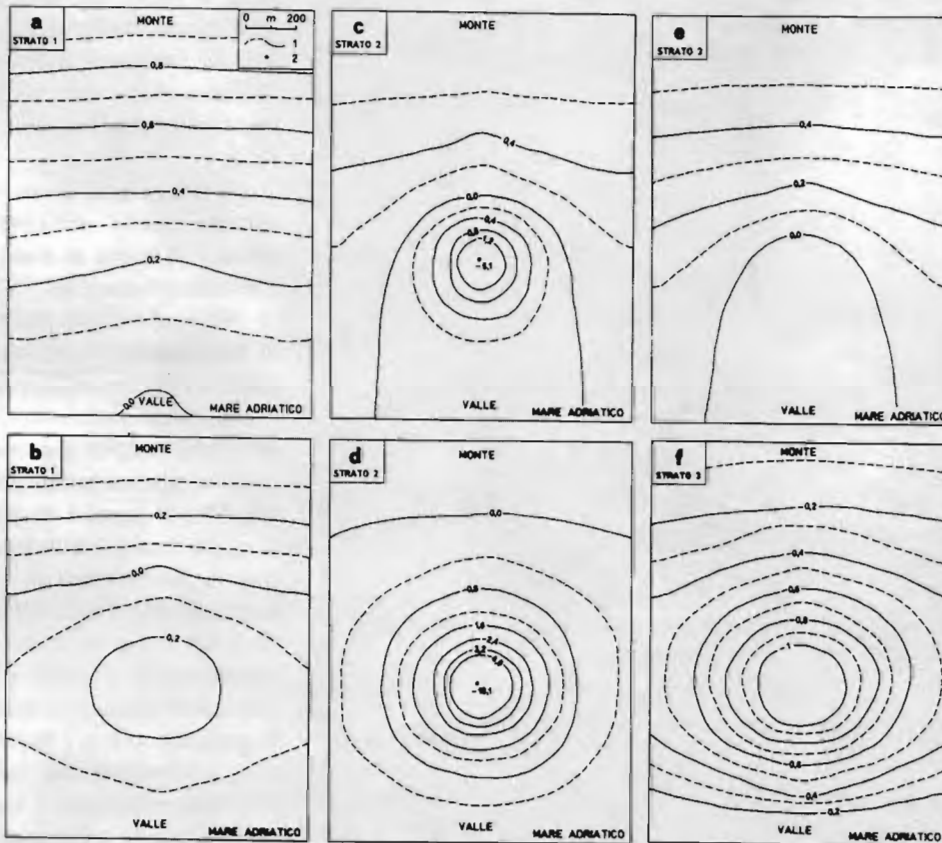


Fig. 13 - QUOTA PIEZOMETRICA (m slm) NEI TRE STRATI, CAUSATA DA UNA PORTATA TOTALE DI PRELIEVO PARI A 6 l/s (a, c, e) e 20 l/s (b, d, f). 1) Linea isovalore, 2) pozzi in presa.

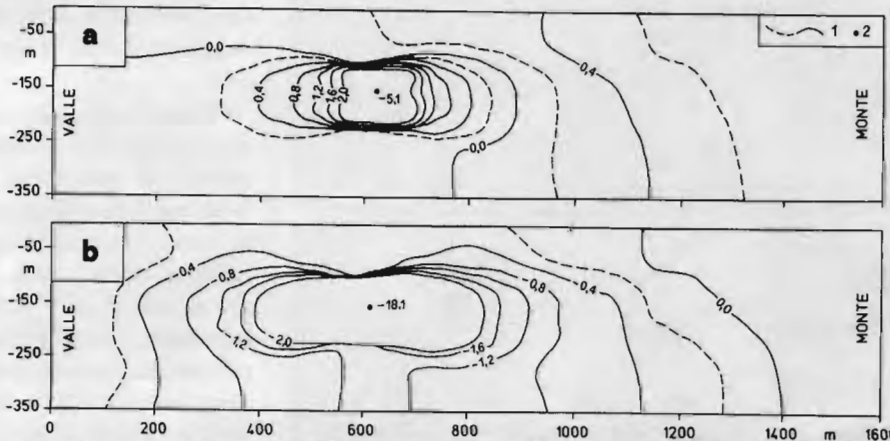


Fig. 14 - SEZIONE VERTICALE MONTE-VALLE PASSANTE PER IL CAMPO POZZI: QUOTA PIEZOMETRICA (m slm) PORTATA TOTALE DI PRELIEVO PARI A (a) 6 l/s, (b) PARI A 20 l/s. 1) Linea isovalore, 2) pozzi in presa.

giore estensione della zona simulata non asseconda le finalità di questo lavoro, viste le crescenti difficoltà, ovvero le crescenti approssimazioni, nel caratterizzare il mezzo e le potenzialità della falda.

E' emerso che la soluzione della presa-resa sia l'unica che, a prescindere dal regime, non causi un richiamo diretto di acqua marina, anche a così modesta distanza dalla costa.

La simulazione del flusso idrico ha confermato la presenza di circuiti di flusso quasi chiusi, con forti scambi idrici verticali nei due versi.

Tale effetto, solo intuito sulla base delle simulazioni del trasporto di soluto, ha così una conferma quantitativa.

Le simulazioni effettuate hanno peraltro dimostrato che, qualunque sia la scelta in termini di portata, di presa-resa o di solo presa, purchè il tratto filtrante dei pozzi sia a non meno di 100m dal p.c., gli effetti al tetto dell'acquifero in termini di depressioni piezometriche sono generalmente modesti e comunque sempre positivi e almeno, nell'ordine di grandezza dei centimetri, nulli. Ciò permette di garantire che tale tipo di utilizzo non possa creare alcun nocumento alle fondazioni.

5. CONCLUSIONI

I risultati emersi dagli studi di condotti, basati sulla conoscenza dell'ambiente idrogeologico e delle caratteristiche reali degli impianti che lo sfruttano, hanno permesso sia di accertare i rischi potenziali associati a tale tipo di uso che di fornire utili indicazioni per prevenire o attenuare un ulteriore degrado della risorsa idrica.

Preso atto che nell'area la falda profonda circola in condizioni freatiche o solo moderatamente in pressione, è stato determinato un profilo verticale della permeabilità con valori decrescenti da 10^{-3} a 10^{-6}

m/s. In particolare, è emerso che l'aumento della profondità dei pozzi va incontro ad una progressiva riduzione della permeabilità dell'acquifero, tale che è da considerare privo di utilità l'approfondimento dei pozzi oltre i 200 m dal p.c.

L'uso di pozzi profondi non più di 100m, filtranti quindi nella porzione più permeabile dell'acquifero, fornirebbe elevate portate con il minimo costo, creando però rischi rilevanti connessi alla crescente salinizzazione delle acque sotterranee. Si è visto che ciò provocherebbe, anche nel caso della presa-resa, l'ulteriore estensione della zona di transizione a tutta la falda idrica, coinvolgendo nel fenomeno dell'inquinamento salino le residue acque sotterranee ancora utilizzabili a fini industriali e agricoli nella periferia urbana.

La soluzione di presa-resa più semplice che offra garanzie dai rischi di salinizzazione è quella che prevede una quota di scambio idrico posta a 100m di profondità dal p.c., o più, fino a 200 m. E' stato accertato che comunque si determina una rilevante anomalia nel campo delle salinità, avente forma lenticolare allungata nella direzione di flusso idrico naturale. Tale fenomeno è stato spiegato sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, anche grazie ai modelli a tre dimensioni del solo flusso, mediante la presenza di rilevanti componenti verticali del flusso idrico, dirette verso e provenienti dai tratti di presa e resa.

La scelta di disporre i pozzi di presa a monte si è dimostrata felice in quanto ciò non solo ha contenuto gli incrementi della salinità in quanto la resa effettuata a valle ostacola l'intrusione marina, ma ha anche contenuto le altezze del pseudo-cono di sovrappressione, in virtù dell'effetto vincolante del mare. Ciò comporta che gli incrementi pie-

zometrici, temuti in relazione alla stabilità e alla funzionalità degli edifici realizzati immediatamente al di sopra del tetto della falda, sono state sempre inferiori, in valore assoluto, a quelli dei decrementi.

Le variazioni piezometriche registrate negli strati interessati dalle colonne filtranti, previste da 100 a 200m dal p.c., sono state enormi in tutti i casi in cui la portata totale scambiata risultata pari a circa 4-10 volte quella naturale fluente.

La soluzione della presa-resa è risultata decisamente preferibile rispetto a quella del solo prelievo in quanto ha sempre impedito, qualunque fosse la portata, il richiamo diretto di acqua di mare.

In tutti i casi di presa-resa esaminati le variazioni piezometriche registrate nella porzione più superficiale dell'acquifero sono state al più praticamente nulle e generalmente negative (depressioni).

La rappresentazione grafica di parte dei risultati ha evidenziato come la presa-resa determini dei circuiti grossomodo chiusi, con non trascurabili componenti verticali, e che determinano delle anomalie nel campo piezometrico di forma lenticolare.

Gli effetti del solo prelievo sono risultati, in termini piezometrici, sempre più intensi e più estesi, causando sempre il richiamo diretto di acqua marina.

Gli approfondimenti maturati concordano nell'indicare la fascia acquifera posta tra 100 e 200 m di profondità dal p.c. come quella ottimale, per soddisfare le molteplici esigenze ad oggi emerse.

La caratterizzazione dei fenomeni e le linee guida definite rendono perseguibile l'esigenza di non influire sull'inquinamento salino delle acque sotterranee non ancora compromesse da salsificazione e permettono di escludere effetti sulla stabilità delle fon-

dazioni degli edifici.

Tale esperienza mostra come il ricorso a tecniche numeriche che permettano la simulazione del flusso idrico sotterraneo anche in funzione dei gradienti di densità dell'acqua fornisca risultati utili per il corretto utilizzo delle risorse idriche sotterranee.

Lavoro presentato al:

IV° Workshop Informativa e Scienza della Terra, Sarnano, Ottobre 1993.

BIBLIOGRAFIA

[1] BEAR J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, New York. pp. 567.

[2] CELICO P. (1986). *Prospezioni idrogeologiche I*. Liguori Editore, Napoli, pp. 1-735.

[3] CESTARI F. (1990). *Prove geotecniche in sito*. Ed. GEO-GRAPH, Segrate, pp. 1-401.

[4] CHERUBINI C., RAMUNNI F., BLASI F. (1991). Un esempio di impermeabilizzazione di rocce calcaree fessurate e carsiche sotto falda. *Proc. Int. Conf. on Environmental Changes in Karst Areas, Italy* 15-27 Settembre 1991, Quaderni del Dip. di Geografia n. 13, Università di Padova, 109-116.

[5] CLARKE D. (1988). *Groundwater discharge tests: simulation and analysis*. Developments in water sciences, n. 37, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-375.

[6] COTECCHIA V. (1973). La carta geotecnica della Puglia ed i problemi di fondazione in terra di Bari. *Rassegna Tecnica Pugliese - Continuità*, Anno VII, N. 1-2/3-4. Gennaio-Giugno/Luglio-Dicembre 1973.

[7] COTECCHIA V. (1977). Studi e ricerche sulle acque sotterranee e sull'intrusione marina in Puglia (Penisola Salentina). Quaderno 20, CNR, Roma.

[8] COTECCHIA V. (1982). Le forme di inquinamento marino e antropico della acque sotterranee della terra di Bari prodotto da un incontrollato uso delle risorse idriche. Conferenza Cittadina "Bari": Città-Ambiente", Città di Bari, 71-92, 29-30 aprile 1982. Bari.

[9] COTECCHIA V., FERRARI G., FIDELIBUS C., LENTI V., POLEMIOM., TADOLINI T. (1991). Perturbazioni antropiche irreversibili delle caratteristiche chimico-fisiche dell'acquifero sottostante la città di Bari. Atti del IV Workshop del P.S. CNR "Clima Ambiente e Territorio nel Mezzogiorno", 11-14 novembre 1991, Lecce.

[10] COTECCHIA V., FIDELIBUS M.D., TADOLINI T., TULIPANO L. (1993). Seawater intrusion into karstic coastal aquifers and techniques for sustainable water development. Expert consultation on seawater intrusion, FAO, Cairo.

[11] DAS GUPTA, A. e ONTASHRESHTA, P.R. (1986). Contaminant movement under pumpage-recharge condition in steady state groundwater flow system. *Groundwater*, vol. 24, n. 3, pp. 342-350.

[12] DI FAZIO A., MAGGIORE M., MASCIOPINTO C., TROISI S., VURRO M. (1992). Caratterizzazione idrogeologica di una stazione di misura in ambiente carsico. *Acque sotterranee*, n. 2/92, pp. 17-26.

[13] DI LUISE (1988). Captazione di acque sotterra-

nee da acquiferi carsici per l'approvvigionamento di una sonda di perforazione petrolifera. *Acque Sotterranee*, n. 1/88, pp. 20-28.

[14] FIDELIBUS C., LENTI V., POLEMIO M. (1991). Applicazioni numeriche ai problemi di trasporto di energia e di soluto in un acquifero carbonatico. I Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Gargnano (BS).

[15] GRASSI D. (1971). Primi interventi di risanamento, mediante iniezioni condotte in Puglia su rocce calcaree fessurate e carsiche, situate sotto falda e sotto livello marino. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, Vol. VI, Bari.

[16] GRASSI D. (1973). Fondamentali aspetti dell'idrogeologia carsica della Murgia (Puglia) con particolare riferimento al versante adriatico. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, 8, part. II, Bari.

[17] Grassi D. (1974). Il carsismo murgiano e sua influenza sull'idrogeologia carsica della regione. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, Vol. IX, Bari.

[18] GRASSI D. (1983). Difformità di ambiente idrogeologico promossa in seno alla piattaforma carbonatica appula da un'evoluzione tettonico-carsica differenziata. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, vol. XVIII parte I, Bari.

[19] GRASSI D., MICHELETTI A. (1972). Sul progressivo abbassamento della superficie della falda e sulle interferenze idrologiche tra pozzi osservati nell'hinterland di Bari. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, vol. VI, Bari.

[20] GRASSI D., ROMANAZZI L., SALVEMINI A., SPILOTRO G. (1982). Grado

di evoluzione e ciclicità del fenomeno carsico in Puglia in rapporto all'evoluzione tettonica. *Atti del II Simp. Int. "Utilizzazione delle aree carsiche"*, *Geol. Appl. e Idrogeol.*, vol. XVII parte II, Bari.

[21] GRASSI D., TADOLINI T. (1974). L'acquifero costiero della Murgia Nord-occidentale (Puglia). *Geol. Appl. e Idrogeol.*, vol. IX, Bari.

[22] GRASSI D., TADOLINI T., Tazioli G. S., Tulipano L. (1977). Ricerche sull'anisotropia dei caratteri idrogeologici delle rocce carbonatiche mesozoiche della Murgia nord occidentale. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, vol. XII parte I, Bari.

[23] GRECO A., MONTERISI L. (1993). Geolithological, structural and geotechnical aspects of ancient dunes of Adriatic Coast (Bari, Italy). *Proc. Int. Symp. Int. Geotechnical Engineering of Hard Soil-Soft Rocks*, Balkema Rotterdam, 113-118.

[24] GRECO A., SPILOTRO G. (1982). Paracarsismo d'interfaccia nei depositi quaternari calcarenitici e biocalcarenitici della fascia costiera barese. *Atti del II Simp. Int. "Utilizzazione delle aree carsiche"*, *Geol. Appl. e Idrogeol.*, vol. XVII parte II, Bari.

[25] IANNONE A., PIERI P. (1982). Sedimentazione quaternaria e carsismo sulle Murge. *Atti del II Simp. Int. "Utilizzazione delle aree carsiche"*, *Geol. Appl. e Idrogeol.*, vol. XVII parte II, Bari.

[26] Irsa (1990). Stazione per lo studio sperimentale di fenomeni idrodispersivi in acquiferi fessurati. Quaderni IRSA, CNR, Roma.

[27] KINZELBACH (1985). Groundwater modeling. *Developments in water sciences*, n.25, Elsevier, Am-

sterdam, pp. 1-333.

[28] MCDONALD M.G., HARBAUGH A.W. (1988). A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. USGS.

[29] PIERI P. (1975). Geologia della città di Bari. *Memoria Società Geologica Italiana*, 14, Roma.

[30] PIERI P. (1988). Evoluzione geologica e morfologica dell'area di Bari. *Archeologia di una città. Bari Dalle origini al X secolo*. Edipuglia, Bari, pp. 7-14.

[31] RADINA B. (1958). Sui terreni di fondazione della città di Bari. *Giorn. Gen. Civ.*, fasc. 10, Roma.

[32] RICCHETTI G., CIARANFI N., LUPERTO SINNI E., MONGELLI F. & PIERI P. (1988). Geodinamica ed evoluzione stratigrafico-tettonica dell'avampaese Apulo. *Atti 74° Congresso Na-*

zionale Soc.Geol. Ital., Sorrento.

[33] SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1981). Carta tecnica dell'Italia meridionale. Cassa per il mezzogiorno, Roma.

[34] TADOLINI T., TULIPANO L. (1977). The conditions of the dynamic equilibrium of groundwaters as related to encroaching sea water. *Symposium on "Hydrodynamic diffusion and dispersion in porous media"*, Pavia.

[35] TEDESCHI C., PARBONI F. (1977). Trivelazioni per l'approvvigionamento di acqua di una centrale termoelettrica. *Rivista Italiana di Geotecnica*, XI, pp. 67-83.

[36] ZEZZA F. (1985). Aspetti geologici del territorio di Bari. *Città come Aula. Quaderni del territorio*, EDI-PUGLIA, Bari, pp. 23-32.

Si prepara la X^a edizione della biennale piacentina

Geofluid: in ottobre la mostra delle tecnologie del sottosuolo

Le ultime generazioni in fatto di macchine ed attrezzature tecnologiche per captare ed estrarre le risorse del sottosuolo-acqua, soprattutto in quanto bene primario, ma anche gas e petrolio - saranno esposte al Geofluid '94 in programma a Piacenza dal 6 al 9 ottobre prossimi.

La messa a punto della decima edizione della biennale internazionale della perforazione-unica esposizione specializzata a livello europeo-è in fase di avanzata realizzazione da parte di Piacenza Fiere, l'ente che la organizza con la collaborazione dell'Istituto per il Commercio Estero. Già oggi molte fra le più rappresentative aziende nazionali che operano nel settore hanno confermato la loro partecipazione alla X^a edizione di questa prestigiosa biennale.

Nutrite anche, e superiori alle aspettative, le richieste di partecipazione giunte da parte operatori esteri, a conferma del trend positivo registrato nell'edizione 1992 che aveva visto un incremento, rispetto alla edizione del 1990 pari al 18%. Queste premesse fanno ritenere che l'edizione 94 di Geofluid-rassegna sorta sulle ceneri della Mostra Internazionale degli Idrocarburi, voluta da Mattei nel '56' dopo la scoperta del vicino giacimento di Cortemaggiore-rappresenterà, come ormai da anni, un punto di riferimento per gli operatori del settore in quanto è la sede più qualificata dove si concentrano le tecnologie legate all'estrazione dei fluidi sotterranei.

Indicative in questo senso sono le cifre dell'ultima edizione: 460 espositori, 10.000 visitatori di cui oltre 1000 provenienti da 40 paesi. Assai variegato il ventaglio dei settori espositivi che vanno dalle indagini geofisiche alle macchine per la perforazione, dagli impianti per il disinquinamento del sottosuolo alle rilevazioni geotecniche, quindi tubi di rivestimento, pompe di calore, valvole, raccordi, utensili specilli, sonde, e tutto quanto concerne, appunto, le più avanzate tecnologie escogitate dall'uomo per riuscire a carpire alla terra i suoi tesori. Nell'ambito della rassegna piacentina saranno in programma nei 4 giorni di svolgimento, importanti incontri, tavole rotonde e convegni tecnico-scientifici sui vari temi di attualità.